

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年06月28日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22403008

研究課題名（和文） 2008年中国四川大地震の地震断層掘削における応力測定

研究課題名（英文） Stress measurements in the Scientific Drilling Project of 2008 Wenchuan Earthquake Fault, China

## 研究代表者

林 為人 (LIN Weiren)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー

研究者番号：80371714

## 研究成果の概要（和文）：

地震発生と地震断層の応力変化との関係を解明する目的で、2008年発生した中国四川大地震の震源断層とともに、本研究の開始後に発生した東北地方太平洋沖巨大地震の震源断層の応力測定を行った。東北地震の震源断層である太平洋プレートと北米プレートの境界断層の先端部（日本海溝付近）において、地震発生に伴う顕著な応力の変化があったことを世界で初めて明らかにした。この顕著な応力変化は、津波の巨大化を招いたプレート境界断層先端部の極めて大きなすべりを発生させる一要因である。

## 研究成果の概要（英文）：

To investigate relations of fault rupturing during a great earthquake and stress change, we tried to determine in situ stress state both in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project (WFSD) and in Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) penetrating through the fault ruptured during 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake. We found that in-situ horizontal stress in the vicinity of the Tohoku-Oki earthquake fault decreased during the earthquake distinctly. The stress change suggests an active slip of the frontal plate-interface consistent with coseismic fault weakening and a nearly total stress drop.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	6,400,000	1,920,000	8,320,000

## 研究分野：数物系科学 A

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：応力計測、地震断層、東北地方太平洋沖巨大地震、2008年中国四川地震、科学掘削、掘削コア試料、非弾性ひずみ回復法

## 1. 研究開始当初の背景

地震は、地殻変動に伴い断層面上の応力の蓄積がある限界に達すると発生する事象である。そのため、断層面上に蓄積された応力は

地震時にエネルギーの放出とともに、解放される（降下する）。したがって、断層近傍の応力状態およびその空間分布を知ることが、地震発生・断層すべり（破壊）の進展を理解

するために極めて重要であり、地震に伴って解放されるエネルギーを評価することなどは、防災・減災関連の研究という観点からみても不可欠である。しかし、断層が置かれている地下深部の応力状態は地上では計測不可能であり、断層までの深部掘削が唯一の実施できる機会である。

2008年5月12日に中国で発生した四川大地震は、四川省汶川（Wenchuan）県を震源とし、龍門山（Longmenshan）断層で発生したマグニチュード8（Ms8）の地震であった。中国地質科学院の主導により、この地震の震源断層を掘削するプロジェクト（Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling, WFSD）は、同じ年の11月よりパイロットホール掘削を皮切りに開始した。我々は、そのパイロットホール掘削の試料を用いた予備的な実験により、フィジビリティ検討を行ったうえで、2009年秋に本研究を提案（科研費申請）して、2010年度からWFS Dのメインホール掘削から本研究を行うこととなった。

本研究の開始後、2011年3月11日に東北地方太平洋沖Mw9の巨大地震が発生した。この地震の発生をうけて、統合国際深海掘削計画（IODP）における地球深部探査船「ちきゅう」による第343次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削プロジェクト；Japan Trench Fast Drilling Project（JFAST）」は緊急に計画され、2012年4月～5月に日本海溝の付近にて東北地震時に最も大きくすべったエリアで断層の掘削を行った（図-1）。我々は、当初計画のWFS Dにおける測定を継続しながら、JFASTにも参加して、地震断層の破壊と応力変化との関係を研究することとした。

## 2. 研究の目的

前述のように、地震発生と地震断層面上並びに断層近傍の応力状態は密接な関係にあるため、地震発生サイクルや断層すべりの特性を理解するために、地震発生前後の応力状態を知ることが不可欠である。地震発生の正確な時期が予測できないため、断層を掘削して、地震直前の応力状態を測定することが困難であるが、地震発生後の断層を掘削して、そこ

の応力状態を測定することは、この地震断層のすべりと応力との関係を調べるもっとも有効な手段となる。したがって、本研究は2008年の中国四川 Ms8 地震の断層掘削 WFS D と 2011年の東北 Mw9 巨大地震の断層掘削 JFAST において、応力状態を測定（決定）し、地震時の断層すべりとの関連性を解明することを研究目的として行った。

## 3. 研究の方法

正確な地下深部の応力の計測は、地層の物理性質の測定と比べると、比較的困難であり、これまで様々な手法が提案されたにもかかわらず、完全な手法が存在しない。本研究の担当者らは深部掘削に対して、掘削コアを用いた非弾性ひずみ回復法（略称 ASR 法）や孔内物理検層などの複数の手段を総合的に活用して、それぞれの長所を發揮し、短所を補い、応力を測定することを提唱している（Lin *et al.*, 2006 Tectonophysics）。

中国四川 Ms8 地震の断層掘削 WFS D においては、掘削コア試料を用いた ASR 法により、三次元応力の測定研究を実施した。計測は掘削による応力解放直後のコア試料を用いる必要があるため、中国四

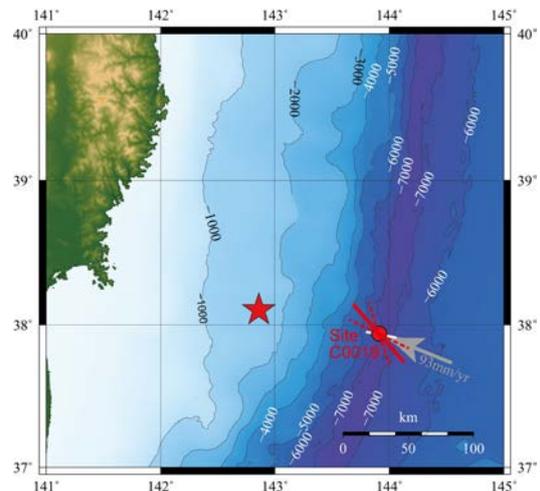


図-1 JFAST の掘削地点（赤丸：掘削サイト C0019；灰色矢印と数字は太平洋プレートの運動方向と年間速度；赤星印は東北地方太平洋沖地震本震の震央；赤の実線は最大水平主応力方向の平均値、破線はその標準偏差を示す）。

川省にある掘削現場の実験室で行わなければならない。したがって、日常のルーチン測定は、中国地質科学院地質研究所の研究者の研究協力により現地で行い、結果の解析は日本で行ってきた。地震後の断層近傍の主応力方向等に関する貴重なデータを得ることができ、現在、学術雑誌に投稿した研究論文は1篇(Wang et al., 2012)がすでに出版されたとともに、2篇(TectonophysicsとRock Mechanics and Rock Engineeringに各1篇)が改定中である。

未曾有の東北 Mw 9 巨大地震の発生を受けて行われた JFAST では、掘削孔内の物理検層で得られた孔壁のイメージに基づいたブレイクアウト解析から応力状態の決定をした。Mw 9 巨大地震の前後では沈み込み帯先端部における顕著な応力の変化があったことを世界で初めて明らかにした。この重要な成果を世界でトップクラスの科学雑誌“SCIENCE”に論文として発表した。したがって、本報告の「3. 研究の方法」と「4. 研究成果」では、JFAST の報告を中心に述べる。

東北地震は、北米プレートと、その下に沈み込む太平洋プレートとの境界断層で発生した。断層破壊は深さ約 24 km の場所(震源)で始まり、プレート境界に沿って進展し、日本海溝、すなわち海底まで突き抜け、巨大な津波を発生させた。JFAST はその断層のすべり挙動を解明する目的で、地震時の断層すべり量が 50m にも及ぶとされる最も大きいプレート境界断層の先端部において、震源断層の掘削を実施した。宮城県牡鹿半島東方沖約 220km、日本海溝まで約 6km、本震の震央から約 93km の掘削地点 C0019 (図-1) で、水深が約 6890m の海底から深度約 820m のプレート境界断層を貫通して、850m まで掘削した。東日本大震災の大津波をもたらした、すべり量が 50m にも及ぶ震源断層を貫通したと考えられる。

掘削サイト C0019 において、水平距離が約 40 m の範囲内において、実施目的の異なる 3 孔 (C0019B、C0019E と C0019D) を掘削した。3 孔のうち、掘削孔 C0019B では掘削同時検層 (Logging-While-Drilling、略称 LWD)

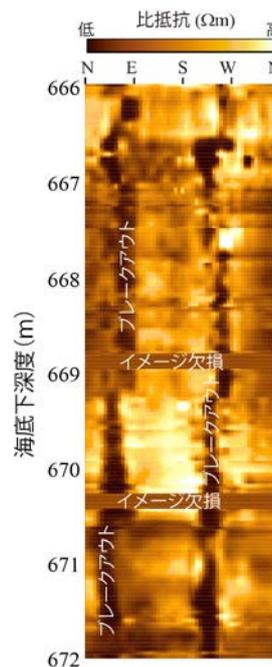


図-2 孔壁の電気抵抗イメージの一例；深度 666m から 672m 区間の孔壁イメージ (円柱状) を平面に展開した図。比抵抗値が低い領域 (電気を通しやすい領域) の黒色帯状の様子がボアホールブレイクアウト。

により海底下 850.5 mbsf (meter below seafloor) までの掘削を行い、孔内の地質状況の把握と断層帯の深度特定を行った。今回用いた LWD ツール、GeoVISION によって、比抵抗、自然ガンマ線、孔壁の比抵抗イメージ (図-2) などの高品質データの取得に成功した。

掘削する場合は、掘削孔壁の周りに応力の集中が必ず発生する。この応力集中は孔壁岩石の耐えられる強度を越した場合、ボアホールブレイクアウト (Borehole Breakout) もしくは単にブレイクアウト (Breakout) と呼ばれる局所的な圧縮破壊が発生する。応力分布が対称になっているので、孔壁に発生するブレイクアウトは対向 2 か所で認められ、かつその方位は必ず最小水平主応力の方位と一致し、最大水平主応力の方位と直交する (90°異なる)。図-2 中の黒色縦の帯状模様はブレイクアウトである。孔壁イメージからこのようなブレイクアウトを特定できれば、水平主応力の方向を比較的簡単に決めることができる。また、ブレイクアウトの幅 (width) を

測定し、別途掘削コア試料を用いて測定した岩石の強度等の物性値とを組み合わせることにより、最大と最小水平主応力値の取り得る範囲 (constraint) を決めることができる。

#### 4. 研究成果

C0019B 孔では比較的多くのブレイクアウトを特定することができた。ブレイクアウトは物理検層による地層区分の Unit I (0-197 mbsf) と II (197~820 mbsf) に存在したが、Unit III (遠洋性粘土質岩層) と IV (チャート) には認められなかった。合計 200 個以上のブレイクアウトを検出することができ、その累積長は全孔長の約 11% に相当する。これらのブレイクアウトの方位から、水平主応力の方向を決定した。その最大水平主応力方向の深度分布は浅部 (約 50~537 mbsf) と深部 (約 537~820 mbsf) で異なる特徴を有することが判明した。

浅部では、特に Unit IIa (約 197~537 mbsf) では、応力の方向が規則性を欠き、“ランダム”の様相を呈した。このような特徴は、既往の沈み込み帯の掘削プロジェクトでは前例がないものであった。深部ではブレイクアウトが北東~南西の卓越方向性を有することが分かった (図-1)。そのことから、深部での水平面内の最大主応力方向は北西~南東であることが判明した。この方向はこの海域の太平洋プレートの沈み込み方向と概ね一致し、また、地震前の掘削 (Ocean Drilling Program (ODP) Leg 186, 1999 年) から決定した三陸沖の最大水平主応力方向 (Lin et al., 2011GRL) とほぼ平行であることが分かった。

ブレイクアウトの幅等を用いて決定した掘削時、すなわち地震発生後の応力状態は、鉛直方向の応力が三次元の最大主応力となり、いわゆる正断層型 (伸張応力場: 地層が水平方向で伸張するような応力場) である。一方、孔壁イメージ解析やコア観察から得られる小断層の構造解析データならびに既往研究 (Kodaira et al., 2012 Nature Geoscience) から、プレート境界断層上盤内の下部の地震前応力は逆断層型 (圧縮場ともいう) であったと推定することができる。したがって、地震前後の応力状態は逆断層型から正断層型に変化したと結論づけることができた (図-3)。

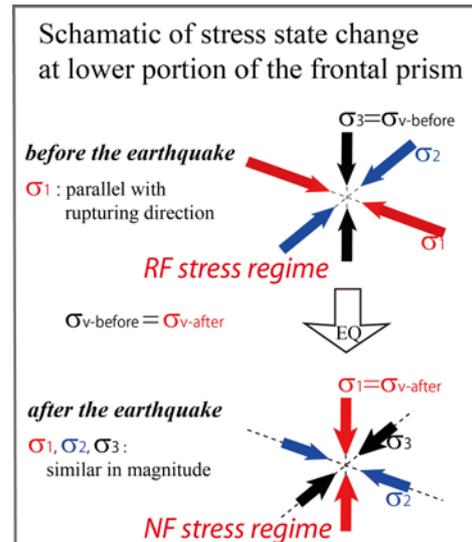


図-3 東北巨大地震前後の応力状態変化模式図 ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  はそれぞれ最大、中間と最小主応力; RF stress regime: 逆断層型応力状態; NF stress regime: 正断層型応力状態)。

この地震に伴う顕著な応力の解放は、エネルギーの放出を意味するものでもあり、Mw 9 地震時の断層すべり量が海溝軸に近づくにつれ、増大したことにつながったと考えられる。従来、非地震性 (Aseismic) であるとされていた海溝軸付近のプレート境界断層は、地震性 (Seismic、地震時ともいう) すべりを起こし、かつ、能動的に滑ったと考えられる。さらに、この応力解放により、断層すべりが海溝軸付近で増幅した結果、東北地方太平洋沖地震に伴った津波が巨大化されたと考えられる。

また、断層に近い深度での地震後応力状態は、3つの主応力値が大差を示さない結果となった。したがって、地震後における断層面上のせん断応力が小さいことが判明した。すなわち、断層面上のせん断応力は、地震時ほぼ完全に解放したと考えられる。また、この結果は、断層が“速度弱化”という仮定に整合する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

① Lin, W., M. Conin, J.C. Moore, F.M. Ch

- ester, Y. Nakamura, J.J. Morim L. Anderson, E.E. Brodsky, H. Eguchi, Expedition 343 Scientists, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 査読有, 339, 2013, 687-690, doi: 10.1126/science.1229379
- ② Yamamoto, Yuzuru, Lin, W. H. Oda, T. Byrne, Yuhji Yamamoto, Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments, *Tectonophysics*, 査読有, 印刷中, 2013, doi: 10.1016/j.tecto.2013.01.028.
- ③ Wang L., Sun D., Lin W., Cui J., Peng H., Gao L., Wang W., Tang Z., Qiao Z., Anelastic strain recovery method to determine in-situ stress and an application example, *Chinese Journal of Geophysics*, 査読有, 55 (3), 2012, 333-342. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.24.
- ④ Lin, W., S. Saito, Y. Sanada, Y. Yamamoto, Y. Hashimoto, T. Kanamatsu, Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 38, 2011, L00G10, doi:10.1029/2011GL049097.
- ⑤ Lin, W., O. Tadai, T. Hirose, W. Tanikawa, M. Takahashi, H. Mukoyoshi, and M. Kinoshita (2011), Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 査読有, 12, 2011, Q0AD14, doi:10.1029/2010GC003449.
- ⑥ Lin, W., E-C. Yeh, J-H. Hung, B. Haimson, T. Hirono, (2010), Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), *Tectonophysics*, 査読有, 482, 82-91, doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.020.
- ⑦ Haimson, B., W. Lin, H. Oku, J-H. Hung, S-R. Song, (2010), Integrating borehole breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan, *Tectonophysics*, 査読有, 482, 65-72, doi: 10.1016/j.tecto.2009.05.016.
- ⑧ Chang, C., L. C. McNeill, J. C. Moore, W. Lin, M. Conin, and Y. Yamada (2010), In situ stress state in the Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 査読有, 11, Q0AD04, doi:10.1029/2010GC003261.
- ⑨ Lin, W., et al. (2010), Present-day principal horizontal stress orientations in the Kuro forearc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 37, L13303, doi: 10.1029/2010GL043158.
- [学会発表] (計 10 件)
- ① Lin, W., M. Conin; J. C. Moore; F. M. Chester; Y. Nakamura; L. Anderson; J. Mori; N. Eguchi; S. Toczko; Expedition 343 Scientific Team (2012) Horizontal stress orientations in the largest displacement area of the Mw9.0 Tohoku earthquake, AGU Fall Meeting 2012, T21F-04, 2012. 12.4, San Francisco, USA
- ② Lin, W., Yamamoto, Y. et al., Application of anelastic strain recovery measurement for determining in-situ stress state, 34th International Geological Congress, 2012. 8.6, Brisbane, Australia
- ③ Yamamoto Y., W. Lin, Y. Usui, T. Kanamatsu, S. Saito, X. Zhao, Y. Hashimoto, M. Stipp, K. Ujiie, P. Vannucchi and Expedition 334 Scientists, Spatial and time variations in stress state in the Costa Rica subduction margin, IODP Expedition 334, 34th International Geological Congress, 2012.8.6, Brisbane, Australia
- ④ Takahashi M., W. Lin, M. Sato, On the relationship between 3 dimensional pore geometry and permeability anisotropy of clastic sandstone -discussion on the information of the number of connecting path and tortuosity data obtained by micro focus X ray CT-, 34th International Geological Congress, 2012.8.8, Brisbane, Australia
- ⑤ 山本由弦、林為人、臼井洋一、金松敏也、斎藤実篤、Zhao X., 橋本善孝、Stipp M., 氏家恒太郎、Vannucchi P., コスタリカ沈み込み帯掘削 (Exp.334) における応力・ひずみ解析, 2012年地球惑星連合大会, 2012.5.24, 千葉市、幕張メッセ
- ⑥ Lin W. et al, (2012), Stress state distribution in Nankai subduction zone, southwestern Japan, - A review of results at NanTroSEIZE stage 1 and 2 drilling sites -, International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones, 2012.2.28, Kochi, Japan.
- ⑦ Lin, W., S. Saito, Y. Sanada, Y. Yamamoto, Y. Hashimoto, T. Kanamatsu, (2011), Principal horizontal stress orientations from ODP Leg 186 sites on the deep-sea te

rrace of the Japan Trench prior to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake, AGU Fall Meeting 2011, 2011.12.9, San Francisco, USA

- ⑧ 林 為人、Timothy B. Byrne、山本裕二、山本由弦、木下正高、(2011)、南海トラフ地震発生帯掘削サイトC0009から得られたコア試料を用いたASR法応力測定、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011.5.25、千葉市。
- ⑨ Lin W., O. Tadai, T. Hirose, W. Tanikawa, M. Takahashi, H. Mukoyoshi, and M. Kinoshita, (2011), Measurements of thermal conductivities under high pressure in core samples from an ocean scientific drilling project, IUGG 2011, #1007, 4 July 2011. Melbourne, Australia.
- ⑩ J. Cui, W. Lin, L. Wang, Z.Tang, D. Sun, L. Gao, W. Wang, (2010), Determination of three-dimensional stress orientations in the Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD) hole-1: A preliminary result by anelastic strain recovery measurements of core samples, AGU 2010 Fall Meeting, 2010.12.10, San Francisco, USA

〔図書(論文集)〕 (計 3 件)

- ① Lin W., (2011), Determination of principal stress orientations from wireline logging caliper data and borehole images in deep drilling, in Qian and Zhou (eds): *Harmonising Rock Engineering and the Environment (Proceedings of 12nd ISRM International Congress on Rock Mechanics)*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-203-13529-9 (ebook), pp.1045-1048.
- ② Lin W., T. Byrne, A. Tsutsumi, C. Chang, Y. Yamamoto, and A. Sakaguchi, (2010), A comparison of stress orientations determined by two independent methods in a deep drilling project, Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering, (Proceedings of the Europe Rock Mechanics symposium (EUROCK) 2010, Ed: J. Zhao et al, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-58654-2, Lausanne, Switzerland, June 2010, pp.749-752.
- ③ Lin W., T. Byrne, A. Tsutsumi, Yuhji Yamamoto, A. Sakaguchi, Yuzuru Yamamoto, and C. Chang, (2010), Applications of anelastic strain measurements in scientific ocean deep drillings, in editor: F. Xie, Rock Stress and

Earthquake (Proceedings of the Fifth International Symposium on In Situ Rock Stress), Publisher: Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-60165-8, pp.199-204, 2010.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

林 為人 (Lin Weiren)  
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア  
研究所・グループリーダー  
研究者番号：80371714

### (2)研究分担者

山本 由弦 (Yamamoto Yuzuru)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・研究員  
研究者番号：10435753